

# СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ SI-GE, ВЫРОЩЕННЫХ В НАПРАВЛЕНИИ <011>

**к.т.н. Носко О.А., асп. Купчинская А.О.**

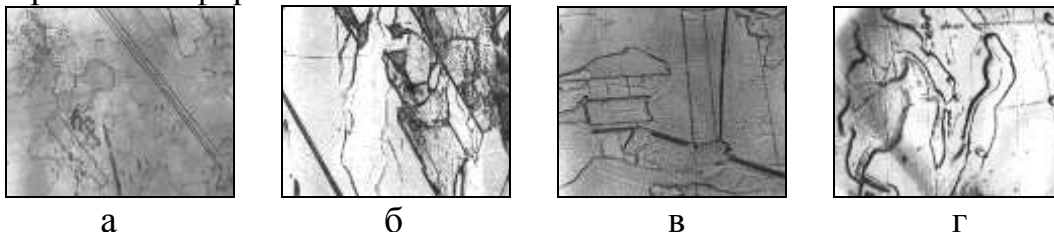
*руководитель – профессор, д.т.н. Куцова В.З.*

*Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск*

[root@lks.dp.ua](mailto:root@lks.dp.ua)

Методом Чохральского получены высокоэффективные термоэлектрические многокомпонентные сплавы на основе твердого раствора  $\text{Si}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}$  (направление выращивания <011>). Образцы сплава  $\text{Si}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}$  p-типа легированы фосфидом галлия в количестве 2 и 5 моль.

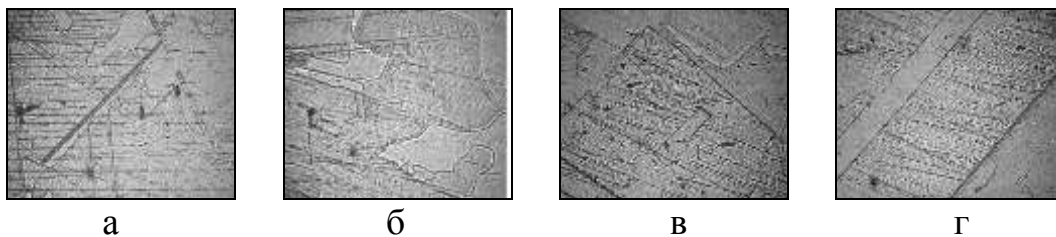
На рис. 1 представлена микроструктура исследованного сплава в исходном состоянии. Анализ рис. 1 свидетельствует о существенной неоднородности сплава  $\text{Si}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}$  в исходном состоянии. В структуре наряду с областями матричной фазы присутствуют двойники и дислокации в виде областей локализованного сдвига. Наряду с выше описанными дефектами, встречающимися при выращивании полупроводниковых кремния и германия, в исследованных сплавах  $\text{Si}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}$  в исходном состоянии выявлены описанные ранее в [1] дефекты, которые называются X-фазой. Кристаллы X-фазы имеют в сечении достаточно правильную геометрическую форму, приближающуюся к ромбам, квадратам, параллелепипедам. Сечения описанных геометрических форм соответствуют, вероятно, включениям ромбической, кубической или комбинированной форм.



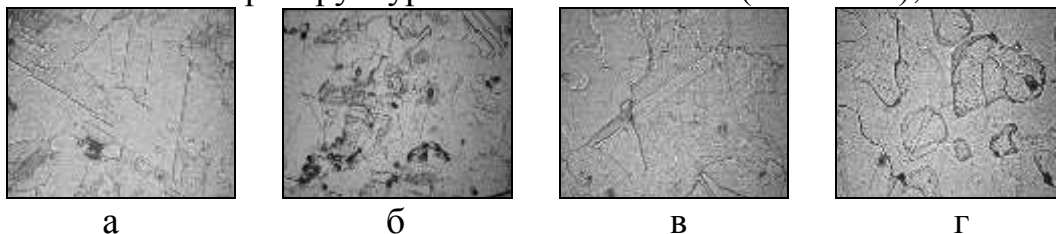
**Рис. 1** Микроструктура сплава Si-Ge в исходном состоянии; а, б, в x 100, г x 500

На рисунке 2 приведена микроструктура сплава Si-Ge-GaP (2 моль %), выращенного методом Чохральского в направлении <011>. В структуре сплава  $\text{Si}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}\text{GaP}$  (2 моль %), дополнительно легированного бором, имеется в наличии большое количество двойников, границ и пакетов двойникования (рис. 2). Также присутствует ранее выявленная X-фаза. Матрица характеризуется повышенной плотностью дислокаций, расположенных преимущественно в виде цепочек.

На рисунке 3 приведена микроструктура сплава Si-Ge-GaP (5 моль %), также выращенного методом Чохральского в направлении <011>. В структуре сплава  $\text{Si}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}+\text{GaP}$  (5 моль %), дополнительно легированного бором, также обнаруживается большое количество двойников, границ и пакетов двойникования, X-фаза с типом решетки отличным от алмазной в виде светлых кристаллов разнообразной формы. Усиливается разнотернистость светлой фазы, наблюдаются зерна разной величины и формы.



**Рис. 2** Микроструктура сплава Si-Ge-GaP (2 моль %); x200



**Рис. 3** Микроструктура сплава Si-Ge-GaP (5 моль %); x200

Матричная фаза характеризуется закономерным расположением цепочек дислокаций, между которыми расположены области, свободные от дислокаций. В структуре выявлены темные включения неправильной формы, вызывающие развитие напряжений в матрице вокруг них и идентифицированные как химические соединения GaP (рис. 3, б). Наличие двойников и дислокаций, обуславливающих значительные напряжения в матрице, скорее всего, будет влиять на свойства полупроводниковых приборов.

Наличие линий сдвига (рис. 4) свидетельствует, прежде всего, о протекании в сплавах Si-Ge-GaP мартенситного превращения [2] по сдвиговому механизму, как показано в работе [3], где утверждается, что «металлизированные» модификации кремния ( $\text{Si}_{\text{ромб}}$ ,  $\text{Si}_{\text{ортIII}}$ ) образуются именно в соответствии с этим механизмом. Результаты микроструктурного анализа подтверждаются данными фазового рентгеноструктурного анализа. На дифрактограммах сплавов кроме линий, соответствующих твердому раствору Si(Ge) с алмазной решеткой, присутствуют дополнительные максимумы, свидетельствующие об образовании твердого раствора Si(Ge) с другим типом решетки. Зафиксированный твердый раствор Si(Ge), характеризуется кубической тетрагональной решеткой с соотношением  $c/a$  от 1,0018 до 1,00225. Аналогичные результаты получены авторами работы [4] при исследовании образцов легированного полупроводникового кремния.

Результаты измерения микротвердости свидетельствуют о неоднородности структуры и фазового состава сплавов, что подтверждается рентгеноструктурным и металлографическим анализом.

Определены абсолютные значения термо-ЭДС для исследованных сплавов в интервале температур 20-800°C.



**Рис. 4** Микроструктура сплава Si-Ge-GaP (2 моль %), выращенного методом Чохральского в направлении  $\langle 011 \rangle$ , после глубокого травления,  $\times 400$

Скачкообразное изменение термо-ЭДС в 5-6 раз (практически на порядок) проявляется при температуре  $550^\circ\text{C}$ . При дальнейшем нагреве до  $800^\circ\text{C}$  имеет место незначительное уменьшение значений термо-ЭДС.

## ВЫВОДЫ

Методом Чохральского получены высокоэффективные термоэлектрические многокомпонентные сплавы, выращенные в направлении  $\langle 011 \rangle$  на основе твердого раствора  $\text{Si}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}$ , легированного фосфидом галлия в количестве 2 моль та 5 моль. Изучены микроструктура, микротвердость, фазовый состав сплавов  $\text{Si}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}$ , комплекснолегированных галлием-фосфором. Показано, что микроструктура исследованных сплавов существенно неоднородна, характеризуется разнотернистостью и дефектностью. Изучена температурная зависимость термо-ЭДС. Установлено, что термоэлектрическая эффективность после легирования достигает для образцов  $\text{Si}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}\text{GaP}$  (2 моль) – 100-130 эВ. Реализация этих материалов в термоэлектрических генераторах значительно увеличит их мощность и эффективность.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куцова В.З., Носко О.А., Новиков М.М., Шерстобітова А.С. Вплив легування на структуру і властивості сплаву  $\text{Si}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}$  / Вісник Київського Національного університету. – 2007. - №3.
2. Г.В. Курдюмов. Бездиффузионные мартенситные превращения. М.: Металлургия. – 1948. – 240 с.
3. Таран Ю.Н., Куцова В.З., Носко О.А. Фазовые переходы полупроводник-металл // Успехи физики металлов. – т.5. – 2004. – С. 87-166.
4. В.З. Куцова, О.А. Носко Вплив легування на структуру та електрофізичні властивості напівпровідникового кремнію // Теория и практика металлургии. - №1. – 2007. – С. 60-65.